

# **Optimización del diseño geométrico de glorietas mediante algoritmos genéticos**

**Rafael Jurado Piña**

Profesor Titular de Universidad Interino (UPM)

**José M<sup>a</sup> Pardillo Mayora**

Profesor Titular de Universidad (UPM)

**Juan Luis Rubio Martín**

Ingeniero de Caminos (doctorando UPM)

## **RESUMEN**

El funcionamiento de las glorietas es sensible a las características geométricas de los elementos que componen el diseño. Generalmente el diseño geométrico es llevado a cabo mediante procedimientos manuales e iterativos, lo que genera un elevado consumo de tiempo del proyectista. Durante el proceso, los ingenieros tratan de encontrar una solución satisfactoria al problema, tanto en planta como en alzado, aplicando unos criterios derivados de normativas y de la propia experiencia del proyectista. Esta tarea es compleja y laboriosa debido al elevado número de variables, y puede ser simplificada mediante la elaboración de unos algoritmos adecuados.

En este artículo se presenta el planteamiento de una metodología que servirá de base para el desarrollo de un modelo de optimización que proporcione la geometría de la glorieta en planta en base a dos objetivos: la consistencia de las velocidades de circulación y la eficiencia operativa. La eficiencia operativa se caracteriza mediante la demora media de los vehículos y su estudio determina el número de carriles necesarios en las entradas y en la calzada anular. La optimización de la consistencia de las velocidades tiene como objetivo reducir los conflictos y la accidentalidad, además de contribuir a la mejora de la eficiencia de la circulación, ya que permite simplificar la tarea de incorporación de los vehículos en el flujo de la calzada anular. Para su cálculo es necesario determinar previamente las trayectorias de los vehículos y los perfiles de velocidades de las trayectorias más rápidas. Una buena consistencia debe minimizar la variación de velocidad entre los elementos geométricos consecutivos y la velocidad relativa entre corrientes de tráfico en conflicto.

Para resolver el problema de optimización se plantea un procedimiento heurístico basado en algoritmos genéticos. El modelo requiere de unos procedimientos para la generación de forma aleatoria de la geometría de la glorieta y para el cálculo de las trayectorias de los vehículos y de las funciones objetivo a partir de la geometría, junto al diseño de unos operadores genéticos que tengan en consideración las interacciones que se presentan entre los elementos que definen la geometría de la glorieta.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El diseño geométrico de las glorietas se lleva a cabo generalmente mediante procedimientos manuales e iterativos, lo cual conlleva un elevado consumo de tiempo del proyectista. Durante el proceso se trata de encontrar una solución satisfactora, que satisfaga las recomendaciones establecidas en las normativas e investigaciones.

Cuando se desea diseñar una glorieta en el lugar en el cual existe una intersección con varios accesos, suelen ser datos de partida las geometrías de éstos. A partir de esta información y de las características del entorno y del tráfico, es preciso conseguir una adecuada geometría de la glorieta, que queda definida mediante una serie de elementos: ubicación del centro de la glorieta, diámetro del círculo inscrito, anchura de cada entrada, anchura de cada salida, anchura de la calzada anular, radio de la isleta central, longitud de las isletas deflectoras, curvatura en las entradas y curvaturas en las salidas.

El funcionamiento de las glorietas es sensible a la elección de los valores de las variables geométricas de los diferentes elementos que la componen. Generalmente, las normativas suelen recomendar unos rangos de valores para cada elemento en función del entorno (urbano, periurbano o interurbano) y del del tráfico.

En este artículo se presenta el planteamiento de la metodología que está siendo desarrollada en el Departamento de Ingeniería Civil: Transportes de la Universidad Politécnica de Madrid para el desarrollo de un modelo de diseño inteligente de glorietas, en el marco del proyecto de investigación “Optimización del diseño geométrico de glorietas mediante algoritmos genéticos (Referencia: TRA2011-25775)”, del Programa Nacional de Proyectos de Investigación Fundamental en el marco del VI Programa Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011. Se pretende que el modelo proporcione la geometría de la glorieta en planta, en intersecciones existentes o en aquellas en las que estén definidas las geometrías de sus accesos, en base a dos objetivos: la consistencia de las velocidades de circulación y la eficiencia operativa. Para resolver el problema de optimización se plantea un procedimiento heurístico basado en algoritmos genéticos.

## **2. PARÁMETROS DE DISEÑO**

El algoritmo parte de una determinada geometría de los accesos a la glorieta. Decidida la tipología de la glorieta en función del tráfico y de las características del entorno, es posible hacer un análisis preliminar de la capacidad y del grado de saturación en las entradas, así como de la demora media de los vehículos, lo cual servirá para decidir el número de carriles necesarios en las entradas y en la calzada anular. En este artículo todo se referirá fundamentalmente a glorietas convencionales, descartándose las miniglorietas.

Fruto del análisis preliminar, es posible definir unos rangos de valores aceptables para los

parámetros que describen cada uno de los elementos geométricos de una glorieta. Estos rangos pueden ser los recomendados por las normativas, resultantes de investigaciones, o sancionados por la experiencia. Los parámetros empleados para caracterizar cada elemento geométrico son los siguientes (Fig. 1):

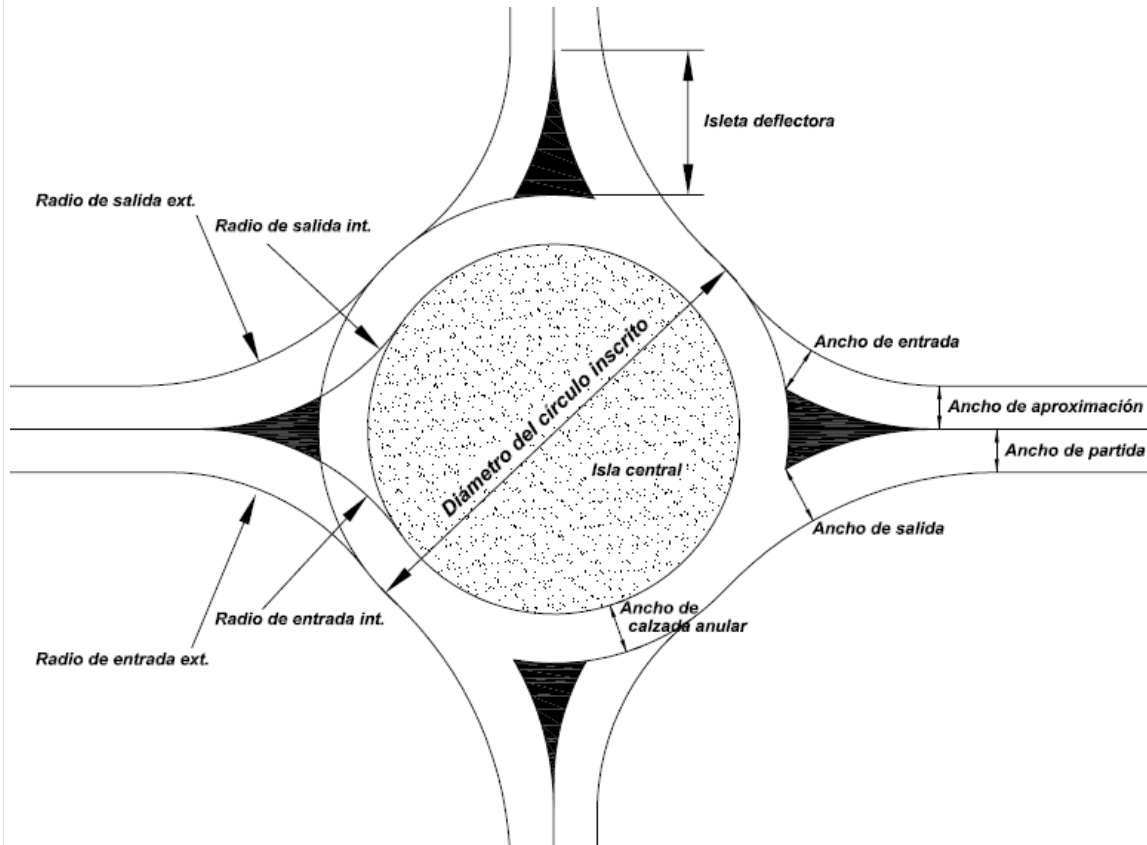


Fig. 1 Parámetros geométricos de la glorieta

- ✓ *Centro de la glorieta ( $X_c, Y_c$ ):* se establecerá previamente un área circular  $A_c$  definida mediante su centro ( $C_c$ ) y su radio ( $r_c$ ); el centro de la glorieta se podrá encontrar en cualquier punto de esa área. Si todas las patas se cortan en un punto, éste se corresponderá con  $C_c$ ; si no se cortan en un punto,  $C_c$  se corresponderá con el baricentro del triángulo definido por la intersección de tres de sus patas (Fig. 2). Una vez definido el centro del área circular  $A_c$ , el centro de la glorieta ( $X_c, Y_c$ ) puede ser definido a partir de dos variables: un acimut (con rango de valores  $[0, 400]$ ) y un radio (con rango  $[0, r_c]$ ).
- ✓ *Diámetro del círculo inscrito ( $D_i$ ):* es el diámetro del borde exterior de la calzada anular. Es el parámetro que define el tamaño de la glorieta, y por lo tanto en su elección suelen influir las características del tráfico y del vehículo tipo. Los umbrales entre los cuales suele moverse esta variable depende de las características del entorno (urbano o interurbano), y del número de carriles que se precisen en la calzada anular. Un rango razonable para glorieta de un carril es 30-40 m.

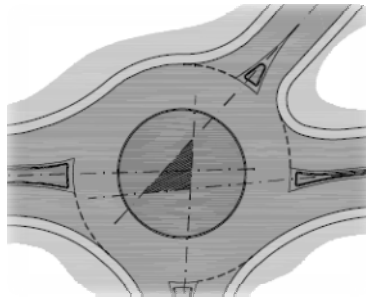


Fig. 2. Polígono de localización del centro de la glorieta

- ✓ *Anchura de la calzada anular ( $C_a$ ):* la anchura de la calzada anular viene determinada por la anchura de las entradas y por las necesidades de acomodar al vehículo de diseño. Debe ser al menos igual a la anchura de la entrada más ancha, hasta un 120% de ésta.
- ✓ *Anchura en las entradas ( $E_a$ ):* esta variable influye fundamentalmente en la capacidad de la entrada, y condiciona también las velocidades alcanadas en la aproximación a la glorieta, y por lo tanto, en la seguridad. Un rango normal para glorietas de un carril es 4,3-4,9 m
- ✓ *Anchura de la salida ( $S_a$ ):* como en el caso anterior, también su valor influye en la capacidad y en la compatibilidad con el paso del vehículo tipo. Un rango de variación razonable en carreteras concencionales de un carril es 4-6 m.
- ✓ *Isleta deflectora:* es un área levantada sobre la calzada o simplemente pintada en ella, que se localiza en los tramos de acceso a la glorieta y que permite guiar las trayectorias en las entradas y salidas, y proporcionar una zona de refugio a los peatones. Este elemento es determinante en el estudio de perfiles de velocidad. Se define a partir de su longitud a lo largo del acceso ( $L_i$ ) medida desde el punto de corde del eje del acceso con el círculo inscrito. Se puede considera una longitud mínima de 15 m.
- ✓ *Anchura en la aproximación ( $A_a$ ):* es la anchura del carril en cada acceso, antes de comenzar la isleta deflectora.
- ✓ *Radios de entrada ( $RE_i$ ,  $RE_e$ ):* radios de las dos curvas circulares (interior y exterior) que definen cada entrada.
- ✓ *Radios de salida ( $RS_i$ ,  $RS_e$ ):* radios de las dos curvas circulares (interior y exterior) que definen cada salida.

### 3. CONSTRUCCIÓN GEOMÉTRICA DE LA GLORIETA

La construcción geométrica de la glorieta se lleva a cabo tomando como datos de partida los ejes de los accesos al anillo. Para ello se parte en primer lugar del rango de valores admisibles de una serie de parámetros (que se denominarán parámetros de primer orden) del diseño geométrico de la glorieta (que son tomados como variables de decisión del problema). Los rangos para otros parámetros (parámetros de segundo orden, que también serán variables de decisión) pueden ser dependientes del valor tanteado para los parámetros de primer orden.

El procedimiento para la construcción de manera aleatoria de la geometría de una glorieta es el siguiente:

1. Generación aleatoria del centro de la glorieta ( $X_c$ ,  $Y_c$ ) dentro del área  $A_c$ .
2. Generación aleatoria del valor del diámetro del círculo inscrito ( $D_j$ ).
3. Generación aleatoria, para cada acceso  $j$ , de la longitud de la isleta deflectora ( $L_j$ ). Se identifica un punto  $P_{j,1}$  situado en el eje del acceso  $j$  a una distancia  $L_j$  del corte con el círculo inscrito.
4. Generación aleatoria de la anchura de la calzada anular ( $C_a$ ).
5. En cada acceso, generación de los arcos que definen las entradas (con radios  $RE_{j,i}$  y  $RE_{j,e}$ ), los cuales quedan unívocamente determinados a partir de los valores de las variables anteriores de la siguiente manera:
  - ✓ Se construye el arco interior con la condición de tangencia al eje del acceso por el punto  $P_{j,1}$ , y tangente asimismo a la isleta central de la glorieta. Queda determinado así el valor de  $RE_{j,i}$
  - ✓ Se determina el punto de corte del arco interior con el círculo inscrito ( $P_{j,2}$ ).
  - ✓ Se genera de forma aleatoria un valor de la anchura de la entrada ( $E_{a,j}$ ). Previamente es preciso verificar que el umbral superior del rango de variación sea inferior a la anchura de la calzada anular; si no es así, dicho umbral superior se tomará igual a la anchura de la calzada anular.
  - ✓ Sobre la alineación recta definida desde el punto  $P_{j,2}$  hasta el centro del arco interior, se define otro punto  $P_{j,3}$  a una distancia igual a la anchura de la entrada  $E_{a,j}$ .
  - ✓ Se construye el arco exterior de forma que pase por el punto  $P_{j,3}$  y sea tangente al borde exterior del acceso y al círculo inscrito. Queda determinado así el valor de  $RE_{j,e}$
6. En cada acceso, generación de los arcos que definen las salidas (con radios  $RS_{j,i}$  y  $RS_{j,e}$ ). Se procede de manera similar a las entradas, si bien en este caso se establecen algunos otros condicionantes para considerar las soluciones no factibles. Así, a efectos de cálculo, se puede reducir el valor de  $L_j$  hasta el valor máximo que permita una solución factible.

#### 4. FUNCIÓN OBJETIVO

Dada una determinada geometría de la glorieta, la cual habrá sido generada de manera aleatoria, es posible a partir de ella construir los caminos más rápidos de los conductores. Una vez elaborados estos caminos para cada uno de los accesos y para las diferentes maniobras, se determinan a partir de ellos los perfiles de velocidades, que serán la base para el cálculo de las funciones objetivo.

En lo que se refiere al cálculo de las trayectorias más rápidas, se utilizan una serie de líneas y circunferencias auxiliares que definen los retranqueos críticos de los bordes de calzada (1 m en mediana y 1,5 m en los radios de entrada-salida) y de la isleta central (1,5 m), y apoyados en éstos se definen de forma general dos movimientos: de giro directo hacia la derecha y de paso.

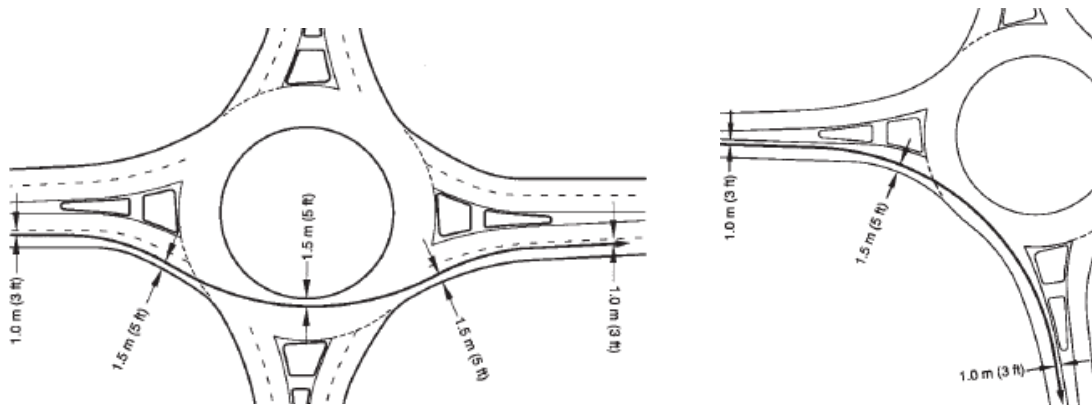


Fig. 3. Trayectorias de paso y giro directo hacia la derecha

Mediante una construcción auxiliar es posible además delimitar el tipo de movimiento. Cada uno de ellos se establece geoméricamente de la siguiente forma:

- Giro directo hacia la derecha, mediante una única curva (puede no existir con determinadas configuraciones de los ejes de acceso).
- Movimiento de paso, que se define con tres curvas de sentido contrario: una de entrada, una de paso por el anillo y otra de salida.

En una circunferencia de radio  $R$  (m) y peralte  $e$  (m/m), la velocidad máxima que puede alcanzarse considerando un rozamiento transversal movilizado  $f$  se determina mediante la siguiente expresión:

$$V = \sqrt{127R(e + f)}$$

Definidos los perfiles de velocidad para cada acceso se pueden establecer los criterios de velocidades máximas y de consistencia de velocidades.

Con relación al primer criterio, éste depende de la localización de la glorieta y del número de carriles. También puede considerarse la presencia de pasos para peatones. Con relación al segundo criterio, se establecen criterios en cuanto a diferencias de velocidades, por ejemplo:

- En movimientos de paso, en los tres arcos de circunferencia que componen la trayectoria de debe verificar que  $V_{\text{entrada}} < V_{\text{anillo}} < V_{\text{salida}}$ .
- En cada acceso, y para cada trayectoria realizada desde el acceso, las velocidades de entrada y de giro por el anillo se comparan con el resto de velocidades de giro por el anillo correspondientes al resto de accesos, con el objeto de minimizarlas.

A partir de estas variables serán diseñadas una o varias funciones objetivo, las cuales permitirán llevar a cabo la optimización con un único objetivo o con varios (multiobjetivo).

## **5. METODOLOGÍA**

### **5.1. Generalidades**

Para la resolución de este complejo problema de optimización se va a recurrir al empleo de algoritmos genéticos. Los algoritmos genéticos (GA) son un método de optimización heurística basada en una búsqueda al azar de las soluciones. Son una poderosa herramienta para la optimización de problemas complejos, cuyas funciones objetivo tienen demasiadas variables o las técnicas de optimización clásicas no se pueden aplicar. GA emulan el comportamiento de la selección natural. Los individuos son soluciones de los problemas, y están codificados en los cromosomas. Cada individuo tiene al menos un cromosoma y cada cromosoma se representa como una cadena numérica donde cada número es un gen, y su posición codifica un parámetro del problema.

En primer lugar se genera al azar una población inicial  $P$  con  $n_p$  individuos, y estos son evaluados de acuerdo con unas funciones objetivo. Este paso inicial es seguido por el bucle principal del proceso, limitado por un número deseado de iteraciones o un criterio de parada. El bucle comienza con un operador de selección, de forma que los individuos que mejor se ajusten a los objetivos tienen una mayor probabilidad de ser elegidos como padres, para aplicarles los operadores de cruce y de mutación. Estos operadores engendran nuevos individuos o niños, que podrán formar parte de la próxima generación en función de su adaptación a los objetivos del problema. Los operadores de cruce permiten el intercambio de información entre los padres para la explotación del dominio de búsqueda. Los operadores de mutación ofrecen nuevos valores para determinados genes y amplían el espacio de búsqueda, lo cual permite evitar los mínimos locales. Todos los nuevos

individuos Q se evalúan y se unen a sus padres P para formar la población P+Q. Dado que el tamaño de la población tiene que seguir siendo igual, una nueva selección se lleva a cabo sobre la población P+Q para la eliminación de los individuos necesarios hasta obtener de nuevo una población P de tamaño  $n_p$ .

## 5.2. Codificación genética

En concordancia con el procedimiento explicado en el apartado 3 para la construcción geométrica de una glorieta, una determinada solución queda definida mediante las siguientes variables:

- Centro de la glorieta ( $X_c, Y_c$ ).
- Diámetro del círculo inscrito ( $D_i$ ).
- Longitud de las isletas deflectoras ( $L_j$ ).
- Anchura de la calzada anular ( $C_a$ ).
- Radios interiores en las salidas  $RS_{j,i}$

Estas variables (genes) pueden ser almacenadas en unos vectores (o cromosomas). Serán empleados en principio tres cromosomas para la definición de un individuo:

$$S_1 = [X_c, Y_c, D_i, C_a]$$

$$S_2 = [L_1, L_2, L_3 \dots L_n]$$

$$S_3 = [RS_{1,i}, RS_{2,i}, RS_{3,i} \dots RS_{n,i}]$$

Donde  $n$  es el número de accesos. De esta manera, cada individuo (solución geométrica de la glorieta) queda definido por el siguiente array, compuesto por los tres cromosomas anteriores:

$$\Lambda = [S_1, S_2, S_3]$$

## 5.3. Descripción del algoritmo de cálculo

En la Figura 4 se muestra de forma esquemática el algoritmo de búsqueda de la solución óptima. Las diferentes etapas que componen el proceso se describen a continuación:



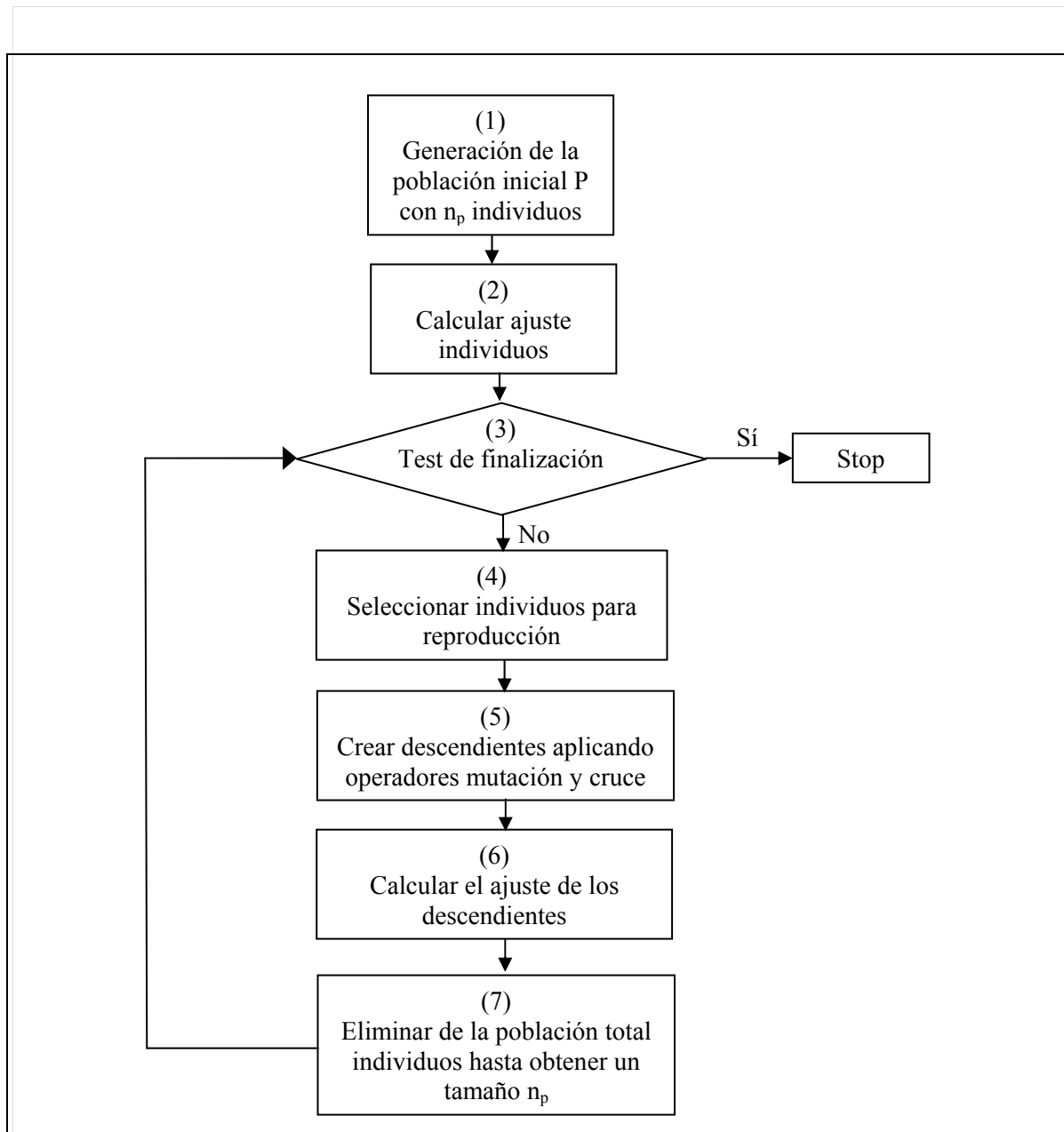


Figura 4. Estructura del algoritmo

- (1) En la primera etapa se genera una piscina de individuos  $\Lambda$  de tamaño  $n_p$ . Para cada uno de ellos, es necesario generar de forma aleatoria los valores de los genes (variables de decisión) de los cromosomas  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$  a partir de una función de distribución de probabilidad uniforme y continua cuyo dominio es definido en el intervalo comprendido entre los valores umbrales inferior y superior establecidos para la variable.
- (2) En la segunda etapa es necesario calcular el grado en que cada individuo de la población inicial se ajusta a los objetivos perseguidos. Para ello, a partir de la información del individuo contenida en los cromosomas, se calcula la geometría de la glorieta, los caminos de los vehículos, los perfiles de velocidades, y finalmente, a partir de estos últimos, los valores de la función objetivo.

- (3) El bucle principal comienza en esta etapa. El bucle se aplica en este problema hasta que se llegue al número máximo de generaciones. El número máximo de generaciones vendrá condicionado por el tamaño de la población inicial y la frecuencia con la que se apliquen los operadores. Las simulaciones realizadas sobre ejemplos concretos podrán determinar los valores recomendables para estos parámetros.
- (4) En la cuarta etapa es necesario seleccionar los padres de la piscina de individuos para su reproducción. Se empleará para ello ruletas de probabilidades basadas tanto en los valores de la función objetivo como en el ranking de soluciones obtenido a partir de estos valores.
- (5) Una vez seleccionados los individuos para su reproducción, en la quinta etapa se aplican sobre ellos los operadores de cruce y de mutación. Se desarrollarán y probarán diferentes operadores adaptados a las características particulares del problema.
- (6) En la sexta fase se determinará, de manera similar a la etapa segunda, el grado de ajuste de los descendientes a los objetivos del problema.
- (7) En la etapa séptima se unen en una única piscina tanto los  $n_p$  individuos iniciales como los descendientes. Posteriormente, se debe reducir la población nueva a un total de  $n_p$  individuos. Para ello, es necesario emplear procedimientos para llevar a cabo la reducción. En general, se planteará el problema tanto para un único objetivo (empleando pesos para los diferentes objetivos parciales), como para una optimización multiobjetivo. En el primer caso se utilizará para la eliminación de los individuos criterios similares a los empleados en la etapa cuarta de selección, aunque introduciendo un criterio elitista para no eliminar las mejores soluciones. En el segundo caso, se emplearán diferentes procedimientos con el objetivo de obtener frentes pareto de soluciones óptimas, para proporcionar al proyectista un abanico de posibles soluciones óptimas entre las que seleccionar la que considera más apropiada.

## 6. CONCLUSIONES

Con la investigación en desarrollo se pretende desarrollar una herramienta para el diseño inteligente de glorietas. Dicha herramienta permitirá ayudar a los proyectistas en la selección del diseño más adecuado de una glorieta, acorde con una serie de objetivos que pueden ser establecidos al comienzo del problema. La herramienta supondrá un avance significativo en las técnicas de diseño de glorietas.

El algoritmo desarrollado servirá además de base para futuros desarrollos que permitan considerar otras variantes del problema: objetivos distintos, optimización considerando accesos no fijos, o nuevas construcciones geométricas para considerar otras disposiciones de las isletas deflectoras.

## REFERENCIAS

AASHTO, 1994. A policy on geometric design of highways and streets. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

Department of Transport (United Kingdom). Geometric Design of Roundabouts. TD 16/93. September 1993.

Michalewicz, Z., 1996. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Program, third ed. Springer, New York.

Puy Huarte, J., 1973. OPYGAR: Optimisation and automatic design of highway profiles. PTRC Seminar Proceedings on Cost Models and Optimisation in Highways (Session L13), London.

Queensland Department of Main Roads (QDMR). Relationships between Roundabout Geometry and Accident Rates. Queensland, Australia: Infrastructure Design of the Technology Division of QDMR, April 1998.

Robinson, B.W., Rodegerdts, L., and Scarborough, W., Roundabouts: An Informational Guide. Report No. FHWA-RD-00-067. Federal Highway Administration (FHWA): Washington, D.C., 2000.